

На правах рукописи

Маркин Николай Егорович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
СЕПАРАТОРОВ С БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2011

Работа выполнена на кафедрах «Электрические машины» и «Электротехника и электротехнологические системы» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коняев Андрей Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Черных Илья Викторович
кандидат технических наук, доцент
Шилин Сергей Иванович

Ведущая организация: ГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»,
г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 22 июня 2011 г. в 14 ч. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.285.03 по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», электротехнический факультет, аудитория Э-406.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан и опубликован на официальном сайте УГТУ-УПИ www.ustu.ru 19 мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.285.03,
доцент, д.т.н.

А.М. Зюзев

Актуальность работы. Для решения ряда технологических задач в области вторичной цветной металлургии находит применение электродинамическая сепарация – метод разделения немагнитных материалов, использующий силовое взаимодействие магнитного поля индуктора с вихревыми токами, наведенными этим полем в проводящих предметах или частицах. Электродинамические сепараторы используются для извлечения металлов из различных сыпучих смесей; для сортировки лома и отходов цветных металлов по сортам и крупности при подготовке к металлургическому переделу; для обогащения алюминиевых шлаков и т.п. Во всех указанных случаях достигается комплексный эколого-экономический эффект, поскольку возвращаются в переработку вторичные металлы, появляются возможности утилизации неметаллических фракций отходов, улучшается качество выплавляемых металлов и сплавов, уменьшается вредное воздействие на окружающую среду металлургических процессов.

В мировой практике для решения указанных задач чаще всего используются электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем, в которых извлекаемые металлические предметы играют роль вторичного элемента (ВЭ) индукционной электрической машины. Наиболее близким аналогом такого сепаратора является линейный асинхронный двигатель с коротким ВЭ. В зависимости от решаемой технологической задачи для возбуждения бегущего магнитного поля используются трехфазные линейные индукторы, либо вращающиеся цилиндрические индукторы с постоянными магнитами или электромагнитами.

К сожалению, в нашей стране технологии и установки электродинамической сепарации не получили достаточного распространения, поскольку зарубежное оборудование дорого, а предлагаемые рядом отечественных производителей установки имеют узкие области применения и не всегда работоспособны. Востребованность рассматриваемых технологий делает актуальными исследования и разработку электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем. Такие разработки ведутся в Уральском государственном техническом университете – УПИ (ныне Уральском федеральном университете), Южно-Российском государственном техническом университете и ряде других организаций. В последние годы разработаны математические модели и методики расчета сепараторов, спроектированы и созданы первые промышленные установки электродинамической сепарации для обработки металлосодержащих отходов. Опыт разработки и эксплуатации электродинамических сепараторов показывает необходимость дальнейшего развития теории таких устройств и совершенствования их конструкций для повышения эффективности сепарации. В частности остаются трудности при сепарации мелких фракций металлов (с крупностью кусков менее 40 мм), а также материалов с малой удельной электропроводностью (например, алюминиевых шлаков). В данной работе предлагается решение указанных вопросов за счет совершенствования конструкций магнитной системы сепараторов с вращающимися индукторами, а также за счет рационального выбора конструкции и параметров механических частей установок, отличающихся, прежде всего, способом подачи сепарируемых материалов и отвода продуктов разделения. Основные исследования, результаты которых представ-

лены в работе, выполнялась в рамках госбюджетной НИР «Разработка научных основ и моделирование энергосберегающих индукционных электротехнологических и электромеханических систем», а также по заказу ряда предприятий (НПФ «Металл-комплект», г. Каменск-Уральский; НПФ «Полимер-Про» (г. Москва), ОАО «Уралпрогресс» (г. Екатеринбург - Асбест) и др.

Область исследования можно определить как специальные электрические машины и электромеханические устройства технологического назначения.

Объектом исследования являются электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем на основе трехфазных линейных индукторов и вращающихся цилиндрических индукторов с постоянными магнитами (электромагнитами).

Цель диссертационной работы: Создание энергоэффективных устройств электродинамической сепарации для сбора и обработки лома и отходов вторичных цветных металлов.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Разработка и апробация математической модели электродинамических сепараторов с вращающимися цилиндрическими индукторами при наличии дополнительных элементов магнитопровода.
2. Исследование влияния конструкции и размеров дополнительных элементов магнитопровода на характеристики магнитного поля в зоне сепарации и на показатели электродинамического сепаратора.
3. Разработка методик расчета электродинамических сепараторов с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил.
4. Исследование влияния конструкции и параметров механической части устройств электродинамической сепарации на энергетические характеристики сепараторов.
5. Получение практических рекомендаций по разработке электродинамических сепараторов, предназначенных для обработки мелкой фракции металлодержащих отходов и сепарации материалов с малой электропроводностью.
6. Создание опытных образцов электродинамических сепараторов, их экспериментальные исследования, включая апробацию конкретных технологических операций по заказам предприятий.

Методы исследования и достоверность результатов: В теоретической части диссертационной работы использовались методы теории электромагнитного поля и теории электрических машин. Математическая модель электродинамического сепаратора с вращающимся цилиндрическим индуктором построена на основе решения полевых задач в двухмерной постановке. Расчеты сепараторов с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил базируются на решении уравнений движения и уравнений энергетического баланса извлекаемых проводящих тел. Основные результаты получены на основе вычислительных экспериментов с использованием возможностей математических пакетов Elcut и Mathcad и физических экспериментов на опытных образцах сепараторов и индукторов, созданных в лаборатории. Достоверность математических моделей и результатов расчетов проверялась сравнением с экспериментальными данными.

Научная новизна:

1. С учетом особенностей электромагнитных процессов в электродинамических сепараторах на базе вращающихся цилиндрических индукторов с дополнительными элементами магнитопровода обоснован выбор их математической модели, основанной на решении полевых задач в двухмерной постановке.

2. Выявлены закономерности распределения магнитного поля в активной зоне рассматриваемых сепараторов при установке дополнительного обратного магнитопровода и магнитных шунтов. Показано, что при рабочих зазорах более 5 мм влияние высших гармоник поля на электромагнитное усилие извлечения не превышает 5-7%.

3. На основе решения уравнений движения и уравнений энергетического баланса для извлекаемых проводящих тел разработаны методики расчета сепараторов с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил для различных типов индукторов и способов подачи сепарируемых материала.

4. Выявлены закономерности изменения требуемого удельного электромагнитного усилия при изменении параметров механической части сепаратора.

Практическая ценность:

1. Разработана методика электромагнитного расчета сепараторов с вращающимися цилиндрическими индукторами и дополнительными элементами магнитопровода. Выполнена апробация методики путем сопоставления с данными экспериментов, показавшего хорошее качественное и количественное совпадение зависимостей (погрешности расчета электромагнитного усилия в широком диапазоне изменения параметров не превышают 15-20%)..

2. Для усиления магнитного поля в активной зоне сепараторов с вращающимися индукторами предложены конструкции, имеющие дополнительные элементы магнитопровода (обратный магнитопровод и (или) магнитные шунты). Показано, что их применение ведет к существенному (в несколько раз) увеличению электромагнитного усилия извлечения.

3. Теоретически и экспериментально показано влияние размеров дополнительных магнитопроводов и магнитных шунтов на характеристики сепараторов (прежде всего, на удельное электромагнитное усилие).

4. Выполнены исследования сепараторов с различными типами индукторов и способов подачи сепарируемых материалов с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил. Показаны пути снижения требуемых удельных электромагнитных усилий и повышения эффективности сепараторов за счет выбора параметров механической части установок.

5. В результате исследований определены требования к электродинамическим сепараторам, предназначенным для обработки мелких фракций отходов и материалов с низкой электропроводностью. Показано, что наиболее эффективно применение сепараторов с вращающимися индукторами, создающими бегущее магнитное поле повышенной частоты (100 – 800 Гц).

6. Созданы опытные образцы электродинамических сепараторов с разными типами индукторов, на которых выполнены экспериментальные исследования и проведена апробация ряда технологий, в том числе по заданию предприятий.

Реализация работы. Основные рекомендации, полученные в работе воплощены в опытных установках электродинамической сепарации, созданных в лаборатории УГТУ-УПИ, и предоставлены заинтересованным предприятиям. В частности, результаты исследований установок для разделения лома медных сплавов по сортам переданы в НПФ «Металл-Комплект» (г. Каменск-Уральский). Предприятию «Полимер-Про» (г. Москва) переданы результаты расчетов и экспериментов на имеющихся в лаборатории установках, доказывающие возможность отделения частиц алюминиевой фольги от дробленых пластиковых отходов и предложения по созданию сепараторов. По заказу предприятия «Уралпрогресс» (г. Асбест) выполнены исследования по обогащению алюминиевых шлаков, определены параметры, требуемые для разработки сепараторов. Созданные установки и методики расчета используются также в учебном процессе кафедр «Электрические машины» и «Электротехника и электро-технологические системы» УГТУ-УПИ (УрФУ), прежде всего при выполнении УИРС и НИРС, в курсовом и дипломном проектировании.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и докладывались на научно-технических конференциях:

1. 12-я Международная НТК «Электромеханика, электротехнологии. электротехнические материалы и компоненты» (Украина, Алушта; 2008).
2. Международная НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург; 2007, 2011).
3. Международная НТК «Успехи современной электротехнологии» (Саратов, 2009).
4. Международная НТК «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (Севастополь, Украина, 2010).
5. Международная НПК «Инновационная энергетика – 2010» (Новосибирск, 2010).
6. Всероссийская НТК «Актуальные проблемы энерго- и ресурсосберегающих электротехнологий» (Екатеринбург; 2006, 2011).
7. Всероссийская НПК «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург; 2010).
8. Всероссийская НПК «Экологические проблемы промышленных регионов» (Екатеринбург; 2004, 2006, 2008).
9. Межвузовская НПК «Автоматизированные информационные и электро-энергетические системы» (Краснодар, 2010).
10. НПК «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» (Екатеринбург; 2003-2010).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 24 печатных работ, в том числе в изданиях рекомендованных ВАК - 5.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти основных разделов, заключения и содержит 129 страниц текста, включает 73 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 89 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цель и основные задачи исследований, а также отражены научная новизна и практическая ценность разработок.

В первом разделе приведен патентно-библиографический обзор отечественных и зарубежных разработок в области электродинамической сепарации: описаны решаемые с помощью сепараторов технологические задачи, показаны основные схемы сепараторов, отличающихся способами подачи и отвода обрабатываемых материалов и конструкциями индукторов, возбуждающих бегущее магнитное поле (рис.1). Обоснована необходимость учета при проектировании сепараторов совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил, чему ранее уделялось недостаточное внимание. Показано, что при обработке мелких фракций материалов предпочтительны сепараторы с вращающимся магнитным полем, работающие на повышенной частоте. Для повышения эффективности таких сепараторов предлагается использовать дополнительные элементы магнитной цепи (обратный магнитопровод и (или) магнитные шунты). Подобные конструкции электродинамических сепараторов исследуются впервые.

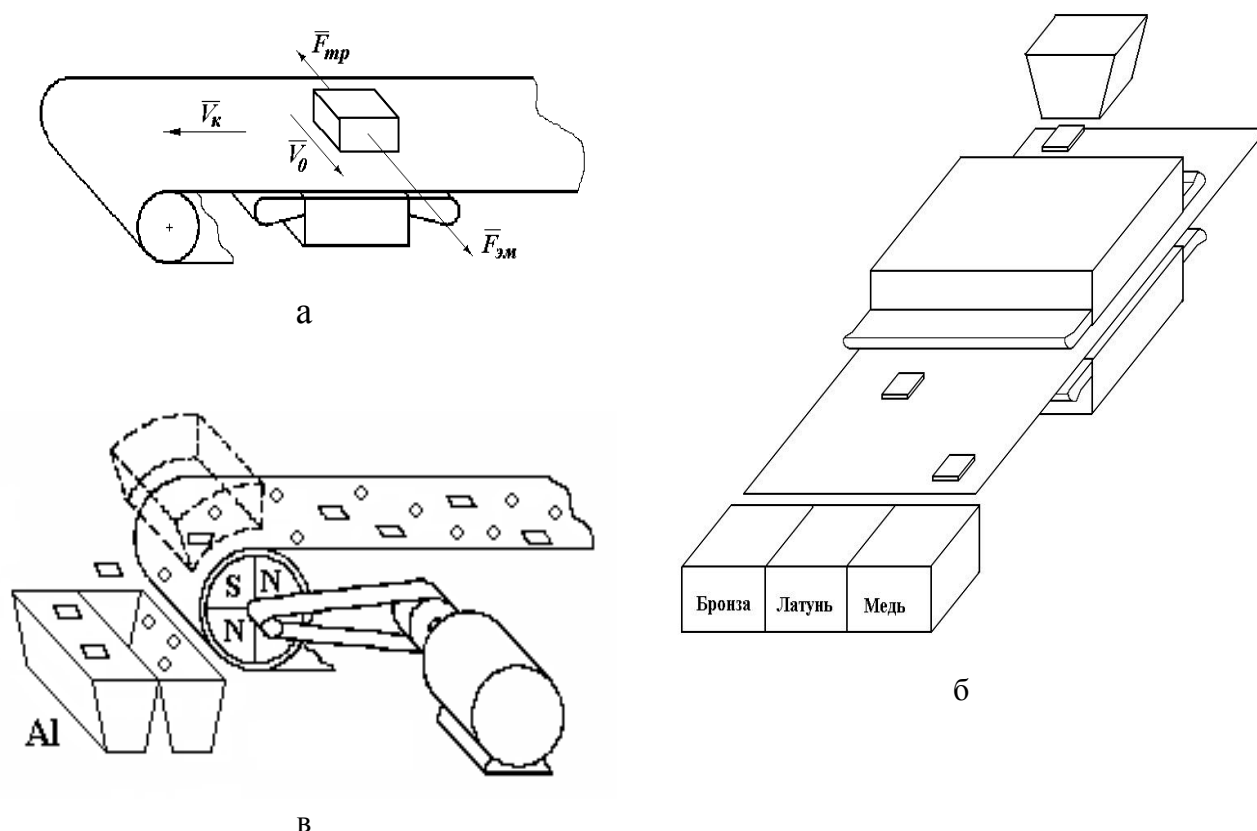


Рис. 1. Электродинамические сепараторы на основе линейных (а-б) и вращающихся (в) индукторов

На основе обзора литературных источников в разделе обоснованы задачи исследования, моделирования и расчета электродинамических сепараторов с учетом указанных конструктивных особенностей.

Во втором разделе проанализированы используемые при расчетах сепараторов математические модели, показаны особенности электромагнитных процессов в электродинамических сепараторах с вращающимися цилиндрическими индукторами при наличии дополнительных элементов магнитной цепи (рис.2) и обоснован выбор математические модели рассматриваемых сепараторов.

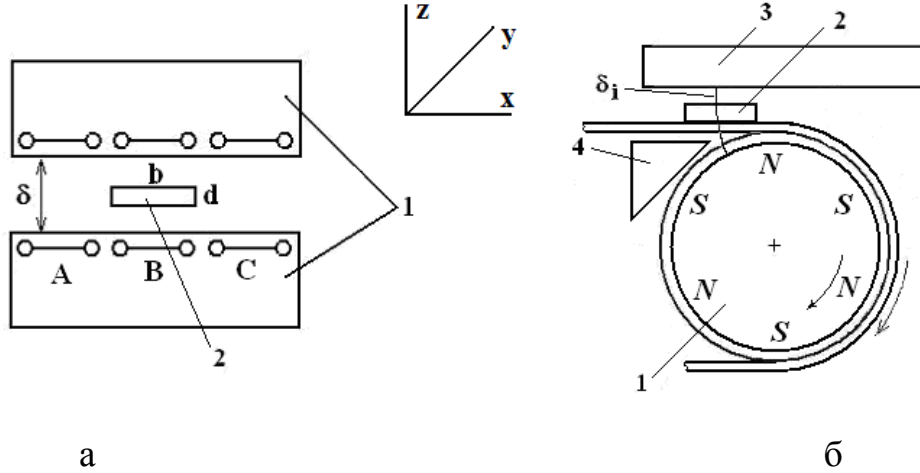


Рис. 2. Конфигурация активной зоны сепараторов с бегущим (а) и вращающимся (б) магнитными полями: 1 – индукторы; 2 – извлекаемая проводящая пластина; 3 – обратный магнитопровод; 4 – магнитный шунт

Сложность расчетов сепараторов связана с необходимостью решения задачи в трехмерной постановке, поскольку магнитное поле имеет сложное распределение в плоскости x - z , а токи, наведенные в проводящей пластине, замыкаются в плоскости x - y . Ранее в УГТУ-УПИ была разработана математическая модель сепаратора на базе трехфазных линейных индукторов (рис. 3,а), основанная на решении совокупности двухмерных задач о распределении магнитного поля в равномерном зазоре между индукторами и вторичных токов в проводящей пластине. Аналитическое решение задачи позволило получить выражение для расчета электромагнитного усилия извлечения:

$$F_x = \frac{4}{\pi^2} \mu_o a b \delta \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \frac{\epsilon_o s J_{1m}^2}{\alpha (1 + \lambda_n^2 / \alpha^2 + j \epsilon_o s)} \cdot \left[1 - k_{1n} \frac{1 - e^{(\chi_{1n} + j\alpha)b}}{(\chi_{1n} + j\alpha)b} + k_{2n} \frac{1 - e^{(\chi_{2n} + j\alpha)b}}{(\chi_{2n} + j\alpha)b} \right] \right\}, \quad (1)$$

где k_{1n} , k_{2n} , χ_{1n} , χ_{2n} – коэффициенты, зависящие, прежде всего, от относительных размеров (b/τ и a/τ) и электромагнитной добротности $\epsilon_o = \frac{\omega \mu_o \gamma}{\alpha^2} \cdot \frac{d}{\delta_p}$ (γ – удельная электропроводность материала; d – толщина ВЭ; δ_p – эквивалентный воздушный зазор; s – скольжение; $\alpha = \pi/\tau$, τ – полюсное деление индуктора)..

В случае сепаратора с вращающимся цилиндрическим индуктором и дополнительными элементами магнитной цепи (рис. 2,б) аналитическое решение задачи о распределении магнитного поля в активной зоне затруднительно. Формально конструкцию с неравномерным зазором можно привести к варианту с линейными индукторами (рис. 2,а), если принять расчетный зазор δ_p равномерным, а изменение магнитного сопротивления зазора учесть соответствующей корректировкой расчетной магнитной проницаемости:

$$\mu(x) = \frac{\mu_0 \delta_p}{\delta_i(x)}, \quad (2)$$

где $\delta_i(x)$ – длина трубки магнитного поля.

С учетом этого магнитное поле вторичных токов в пределах пластины с учетом (2) описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{z2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{z2}}{\partial y^2} - \alpha \varepsilon_0 (1-s) \frac{\partial H_{z2}}{\partial x} - \left(j \alpha^2 \varepsilon_0 + \frac{\alpha \varepsilon_0}{\mu(x)} (1-s) \frac{\partial \mu(x)}{\partial x} \right) H_{z2} = \\ = \alpha \varepsilon_0 s J_{1m} e^{-j \alpha x} - j \frac{\varepsilon_0}{\mu(x)} (1-s) \frac{\partial \mu(x)}{\partial x} J_{1m} e^{-j \alpha x} \end{aligned} \quad (3)$$

где $J_1 = J_{1m} e^{-j \alpha x}$ – расчетная объемная плотность первичного тока индуктора, амплитуда которой в случае равномерного зазора связана с индукцией магнитного поля выражением:

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot \tau}{\pi} J_{1m}. \quad (4)$$

Для упрощения уравнения (3) предлагается рассматривать только режим короткого замыкания (при этом скольжение $s = 1$, и слагаемые, содержащие производную от μ , исчезают). Это допущение позволяет получить аналитическое решение относительно напряженности магнитного поля вторичных токов и использовать для расчета электромагнитного усилия аналитическое выражение (1). В то же время именно от величины пускового усилия зависит работоспособность сепаратора. Предлагаемая замена реального неравномерного зазора равномерным расчетным по (2) означает решение задачи при заданном бегущем магнитном поле индуктора, определяемом по (4). Рассматриваемые сепараторы с вращающимися индукторами предназначены для сепарации проводящих тел крупностью $b < 40$ мм (как правило, $b < 0,5\tau$) в бегущем магнитном поле повышенной частоты (100 - 800 Гц). С учетом этого в работе доказано, что преобладающее распределение вторичных токов будет одноконтурным с явно выраженным поверхностным эффектом, как показано на рис. 3, а величина вторичных э.д.с. и токов определяется магнитным потоком, пронизывающим проводящую пластину. Это делает возможным усреднение значения магнитной

индукции в пределах пластины малых размеров, находящейся в заданной точке активной зоны, и позволяет использовать для расчета поля численные методы (в частности, метод конечных элементов, реализованный в пакете Elcut).

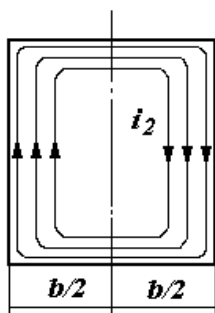
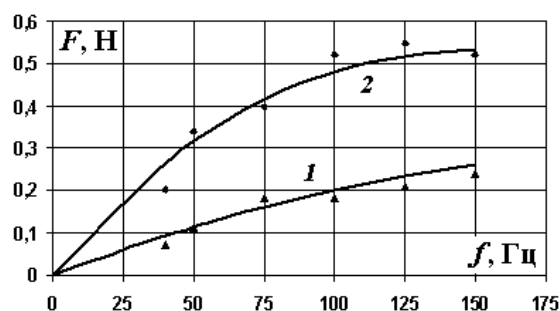


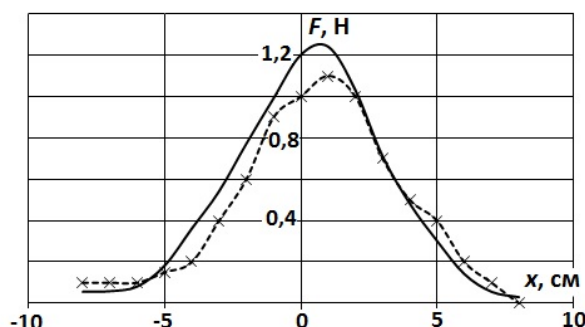
Рис. 3. Распределение вторичных токов в проводящей пластине при $b \ll \tau$

Таким образом, расчет сепараторов с вращающимися цилиндрическими индукторами и дополнительными элементами магнитопровода проводится в два этапа: на первом рассчитывается магнитное поле в месте расположения извлекаемой пластины, на втором определяется электромагнитное усилие извлечения по заданному полю с использованием выражений (1) и (4). Такой подход к моделированию сепараторов со сложной конфигурацией рабочего зазора позволяет избежать трудоемких численных расчетов электромагнитных усилий и дает методику расчета, удобную для поисковых расчетов.

Проверка предлагаемой методики при расчетах опытных образцов сепараторов с вращающимся индуктором, имеющих дополнительный обратный магнитопровод и магнитные шунты, показала, что погрешности расчета усилий не превышают 15-20% и уменьшаются с понижением размеров извлекаемых проводящих предметов и с ростом частоты бегущего магнитного поля (рис. 4).



а



б

Рис. 4. К оценке методик расчета электродинамического сепаратора (расчет – сплошные линии, эксперимент – точки)

В третьей главе излагаются основные результаты исследований влияния дополнительных элементов магнитной цепи на характеристики электродинамических сепараторов с вращающимися цилиндрическими индукторами.

Основные исследования выполнены на опытных установках сепараторов с вращающимися индукторами, конфигурация активной зоны которых показана на рис. 5 (а – сепаратор № 1 с электромагнитным возбуждением, б – сепаратор № 2 с возбуждением от постоянных магнитов). Обратные магнитопроводы (ОМ) располагались на расстоянии не менее 10-15 мм от индуктора, а магнитные шунты (МШ) под лентой, подающей сепарируемые материалы.

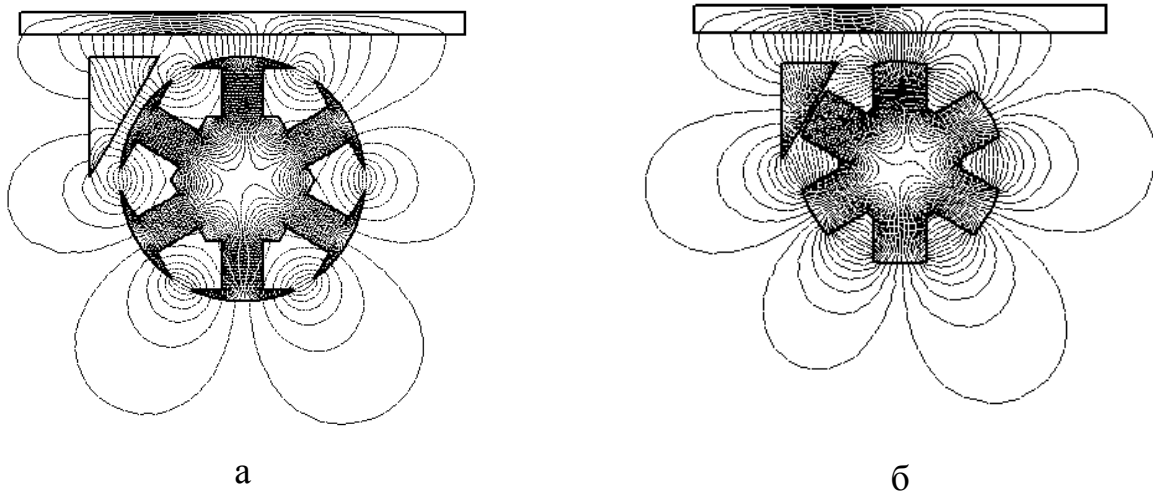
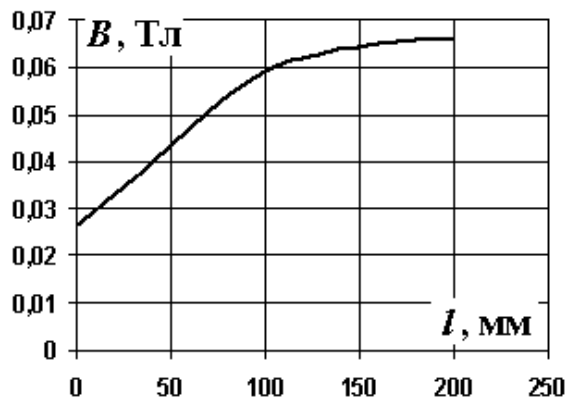
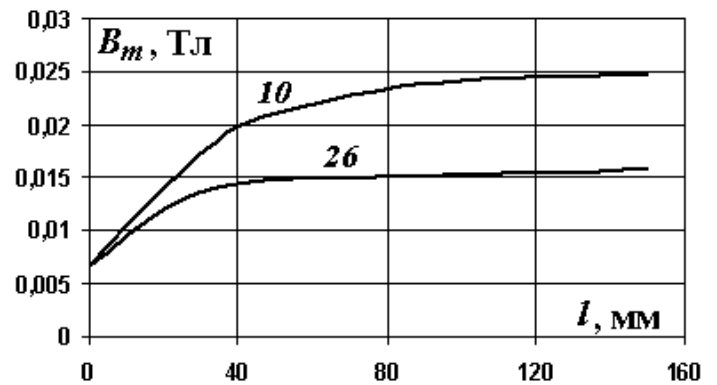


Рис. 5. Картины магнитного поля в сепараторах при наличии обратного магнитопровода и магнитного шунта

Уменьшение магнитного сопротивления рабочего зазора приводит к существенному усилению магнитного поля (примеры на рис. 6) и росту электромагнитного усилия.



а



б

Рис. 6. Зависимости значения магнитной индукции от длины ОМ:
а - для сепаратора № 1 (зазор 10 мм), б - для сепаратора № 2 (зазоры 10 и 26 мм)

В работе выполнена оценка влияния на характеристики сепаратора размеров и расположения дополнительных элементов. Показано, например, что рационально выбирать длину обратного магнитопровода равной диаметру индуктора, что к усилению поля приводят увеличение площади магнитных шунтов, обращенной к обратному магнитопроводу, и уменьшение зазора между ними и индуктором. Оценка искажений формы магнитного поля, обусловленных установкой дополнительных элементов магнитной системы, показала, что при рабочих зазорах более 5 мм влияние высших гармоник поля незначительно (в выполненных расчетах искажение усилия не превышало 5-7%).

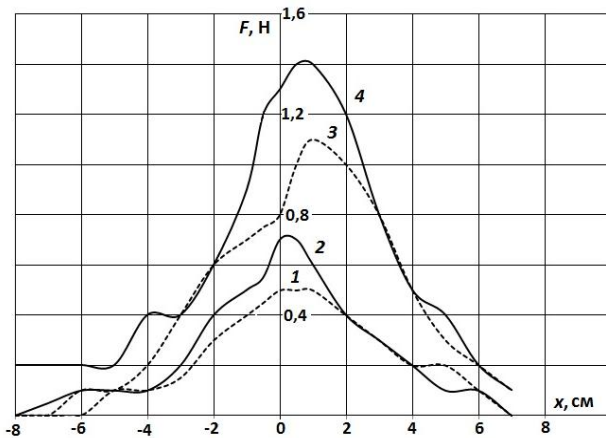


Рис. 7. Электромагнитные усилия, действующие на алюминиевые пластины 30*30*5 мм (1-2) и 40*40*5 мм (3-4), в сепараторе № 1 при отсутствии (1,3) и наличии шунта (2,4)

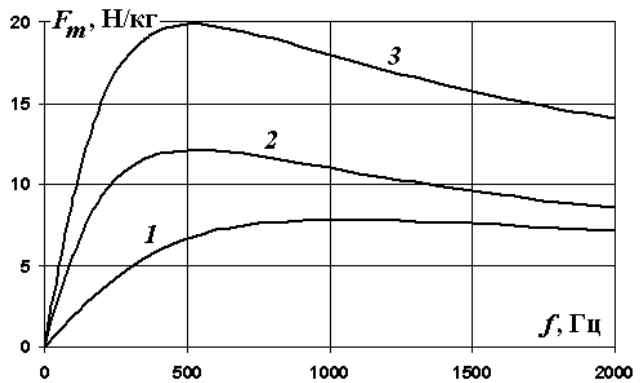


Рис. 8. Зависимости удельного электромагнитного усилия от частоты для сепаратора № 2: с открытым индуктором (1); с ОМ (2); с ОМ и МШ (3)

Существенный рост электромагнитного усилия извлечения подтверждается как экспериментальными исследованиями (примеры на рис. 7), так и расчетами (рис.8). По рис. 8 следует отметить, что при установке дополнительных элементов магнитопровода происходит не только увеличение усилия, но и смещение экстремумов кривых в сторону меньших частот. Таким образом, повышаются как эффективность, так и надежность работы сепараторов. Показано также, что с уменьшением размеров проводящих пластин экстремумы кривых смещаются в сторону больших частот, что оправдывает применение электродинамических сепараторов с вращающимися индукторами, работающими на повышенных частотах.

В четвертом разделе диссертации устройства электродинамической сепарации моделируются и исследуются с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил.

В процессе сепарации на извлекаемые проводящие тела помимо электромагнитных сил действуют различные механические силы, характер и величина которых зависят от конструкции механической части устройств и способов подачи и отвода сепарируемых материалов. Основные варианты установок показаны на рис. 1. Для сепараторов на базе линейных индукторов (рис. 1,а-б) путем решения уравнений движения извлекаемых проводящих тел получены выражения, связывающие требуемое для сепарации удельное электромагнитное усилие (F_m , Н/кг) с параметрами механической части установок. Например, для случая подачи материала по ленте конвейера (рис. 1,а) получено:

$$F_m = \frac{2 \cdot B \cdot V_{\kappa}^2}{L_u^2} + k_{mp} \cdot g, \quad (5)$$

где V_k – скорость подачи материала; B и L_u – ширина ленты конвейера и ширина линейного индуктора; $k_{тр}$ – коэффициент трения, зависящий от материала ленты.

При подаче материала в активную зону сепаратора по наклонной плоскости аналогичное выражение получено в виде:

$$F_m = \frac{2B}{t_u^2} + k_{mp} \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

здесь t_u – время пребывания проводящего тела в активной зоне индуктора

$$t_u = \frac{\sqrt{V_k^2 + 2 \cdot (L_0 + L_u) \cdot g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha)} - \sqrt{V_k^2 + 2L_0 \cdot g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha)}}{g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha)}, \quad (7)$$

где α – угол наклона плоскости; L_0 $L_{п}$ – размеры плоскости перед индуктором и после индуктора; B – необходимое смещение извлекаемых тел.

Несмотря на упрощающие допущения, при которых получены выражения, расчеты по ним дают приемлемое качественное и количественное совпадение с экспериментом. Например, на рис. 9 для опытной установки с наклонной плоскостью приведены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) траектории движения извлекаемых алюминиевых пластин разной формы и размеров: квадратных (1 – сторона квадрата 10 мм, 2 – 15 мм, 3 – 20 мм при толщине 0,2 мм) и круглых (1 – диаметр 25 мм, 2 – 45 мм при толщине 2 мм).

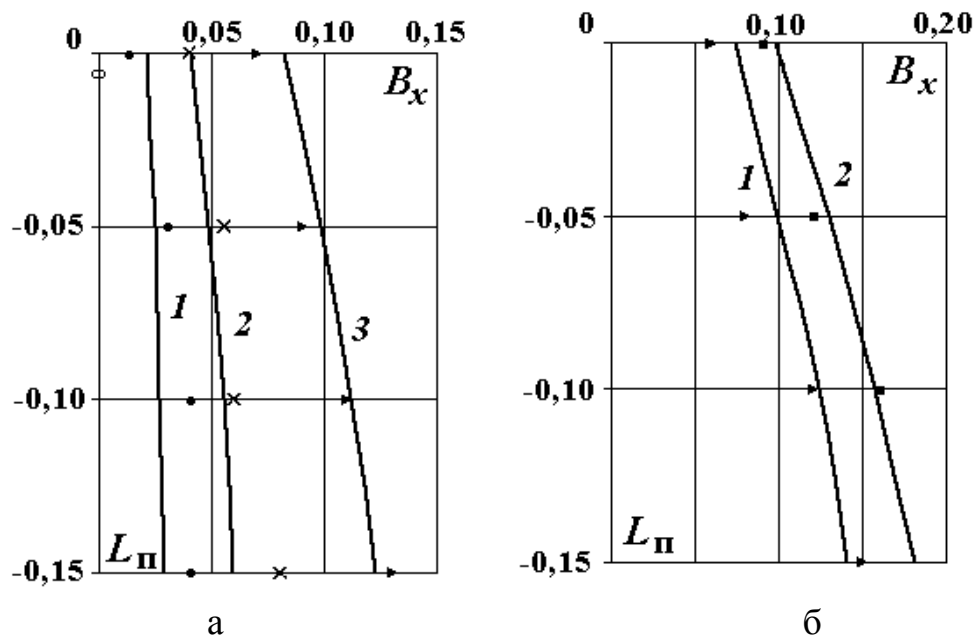


Рис. 9. Траектории движения алюминиевых пластин по наклонной плоскости (а – квадратные пластины, б – круглые)

Приведенные выражения позволяют оценивать влияние на величину требуемого для сепарации удельного электромагнитного усилия различных параметров механической части установок. Некоторые зависимости для той же установки с наклонной плоскостью приведены на рис. 10-11.

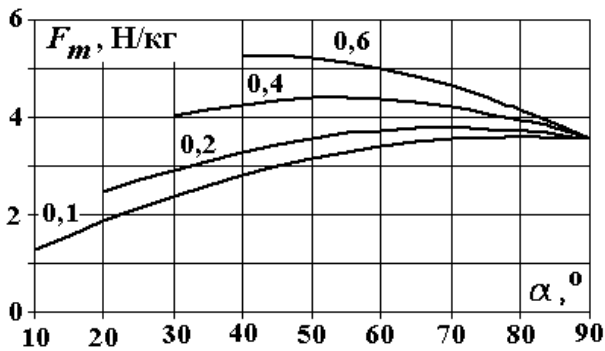
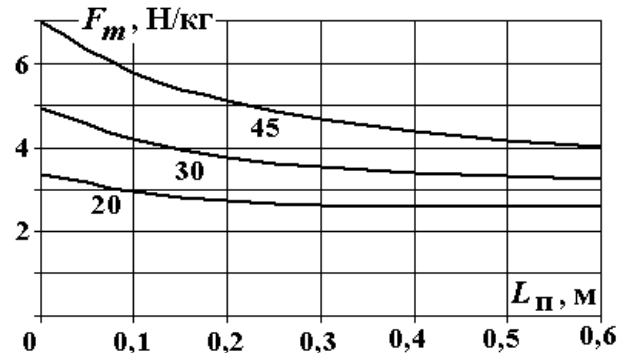
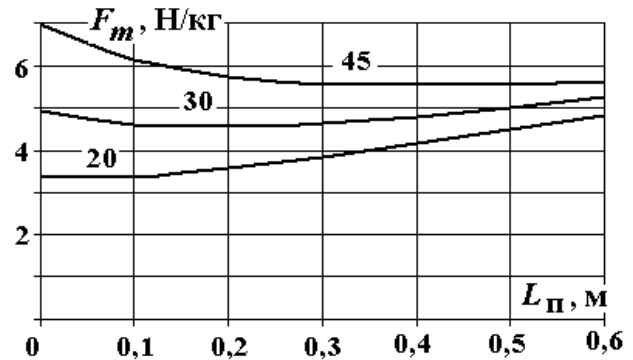


Рис. 10. Зависимости требуемого удельного электромагнитного усилия от угла наклона и коэффициента сопротивления (цифры на графиках)

Рис. 11. Оценка влияния размеров наклонной плоскости на требуемое удельное усилие сепаратора при разных углах наклона (цифры на графиках) и коэффициентах трения ($k_{тр} = 0,1 - а; 0,3 - б$), $L_{п} = 0,1$ м



а



б

При расчетах выявлен экстремальный характер зависимостей, что свидетельствует о необходимости оптимизационных расчетов для достижения минимума требуемого электромагнитного усилия и энергопотребления сепаратора.

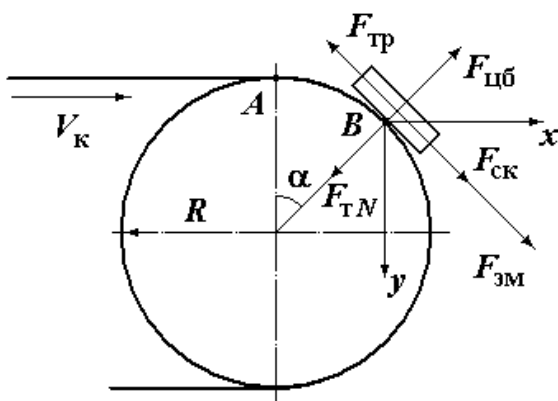


Рис. 12. К расчету параметров движения частицы с учетом действия механических сил в сепараторе шкивного типа

Наибольшее количество механических сил влияет на процесс сепарации в сепараторах шкивного типа. Особенностью рассматриваемой задачи является изменение сил как по величине, так и по направлению. Поэтому решение уравнений движения в этом случае затруднительно. Связь между требуемым удельным электромагнитным усилием и параметрами механической части сепаратора шкивного типа получена при решении уравнения энергетического баланса. В результате решения получены выражения для угла $\alpha_{кр}$, при котором происходит отрыв извлекаемых проводящих тел от ленты, и скорости V_B в точке отрыва:

$$\alpha_{кр} = \frac{(k_{mp} - \frac{2F_m}{g}) + \sqrt{(k_{mp} - \frac{2F_m}{g})^2 + 6(1 - \frac{V_A^2}{gR})}}{3}; \quad (8)$$

$$V_B = \sqrt{V_A^2 + 2gR(1 - \cos \alpha_{кр}) + (2F_m - k_{mp}g) \cdot R\alpha_{кр}}. \quad (9)$$

Используя (8)-(9), можно рассчитать траекторию полета извлекаемых проводящих тел:

$$x = R \cdot \sin \alpha_{кр} + V_{Bx} \cdot t, \quad (10)$$

$$y = R \cdot (1 - \cos \alpha_{кр}) + V_{By} \cdot t + \frac{gt^2}{2}, \quad (11)$$

где $V_{Bx} = V_B \cdot \cos \alpha_{кр}$ и $V_{By} = V_B \cdot \sin \alpha_{кр}$ – проекции вектора скорости в точке отрыва на оси координат.

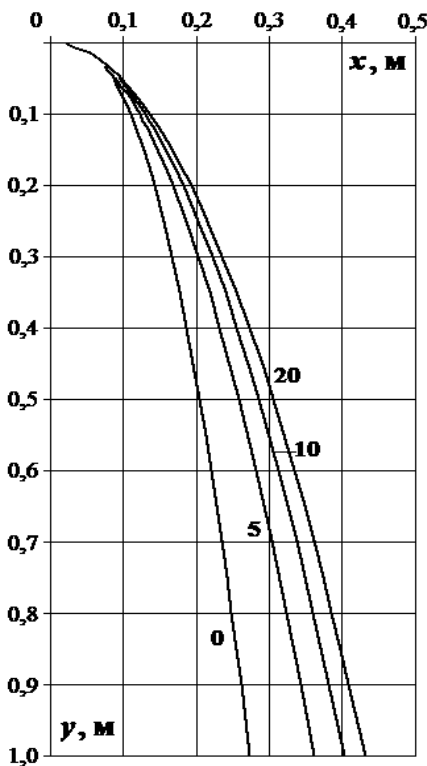


Рис. 13. Траектории полета разделяемых частиц в сепараторах шкивного типа Цифрами на графиках показаны развиваемые удельные электромагнитные усилия F_m (Н/кг)

Примеры расчета траекторий полета сепарируемых тел, имеющих разную электропроводность, для опытного сепаратора с радиусом индуктора 0,1 м показан на рис. 13. Графики хорошо иллюстрируют возможность отделения проводящих тел от непроводящих, а также сортировки металлов с разной электропроводностью.

В целом разработанные методики позволяют находить эффективные решения, позволяющие уменьшать мощность и энергозатраты электродинамических сепараторов. Во всех рассмотренных случаях задача выбора конструкции и параметров установок электродинамической сепарации является многофакторной. Результаты выбора зависят от решаемой технологической задачи, размеров извлекаемых тел, производительности установок, накладываемых ограничений (по габаритам или потребляемой мощности), поэтому практические рекомендации могут быть получены только для конкретных случаев.

В пятом разделе диссертации описываются опытные установки электродинамической сепарации, созданные при непосредственном участии автора, и излагаются результаты их экспериментальных исследований. Эксперименты выполнены с целью выявления и подтверждения обнаруженных закономерностей и проверки методик расчета, а также для апробации различных технологий сепарации в том числе по заказам предприятий. экспериментальные установки электродинамической сепарации с различными способами возбуждения магнитного поля:

- сепараторы основе линейных индукторов, отличающихся мощностью, основными размерами и способами подачи и отвода обрабатываемых материалов;
- установка с вращающимися электромагнитами на основе шестиполюсного ротора синхронной машины (диаметр 111мм, полюсное деление 58 мм, номинальный ток - 2 А, частота магнитного поля от 50 до 350 Гц) предусмотрена возможность установки обратного магнитопровода и магнитных шунтов (ранее обозначен как сепаратор № 1);
- сепаратор с вращающимся магнитным полем, имеющий шестиполюсный индуктор с постоянными магнитами (диаметр 74 мм, полюсное деление 38.75 мм, рабочие частоты 50 – 750 Гц), предусмотрена возможность установки обратного магнитопровода и магнитных шунтов (сепаратор № 2);
- опытная установка для сепарации бронзовой стружки.

Некоторые из созданных установок показаны на рис. 14-16.

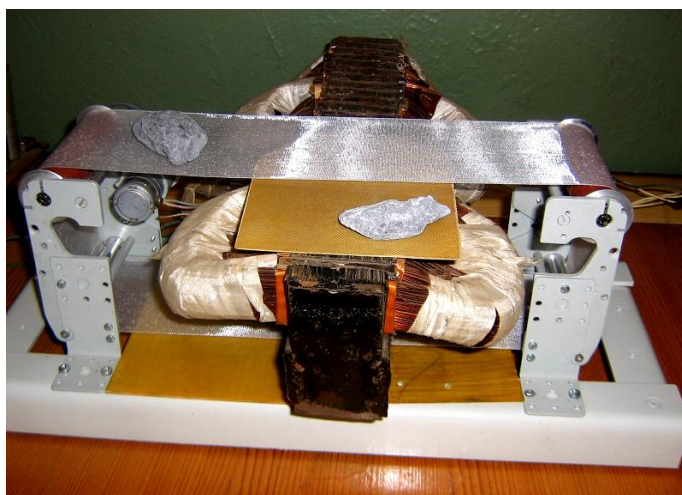


Рис. 14. Опытная установка с линейным индуктором при опробовании операции обогащения алюминиевых шлаков



Рис. 15. Установка с линейными индукторами для сепарации фольгированных пластиков



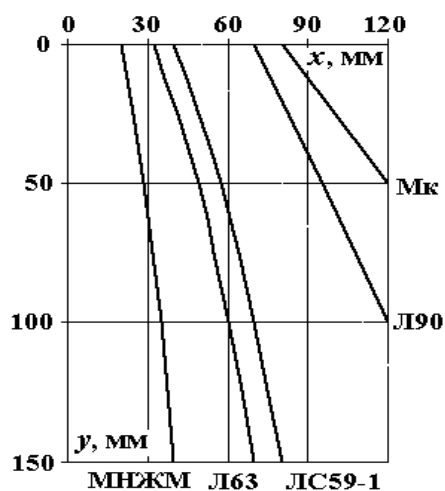
а



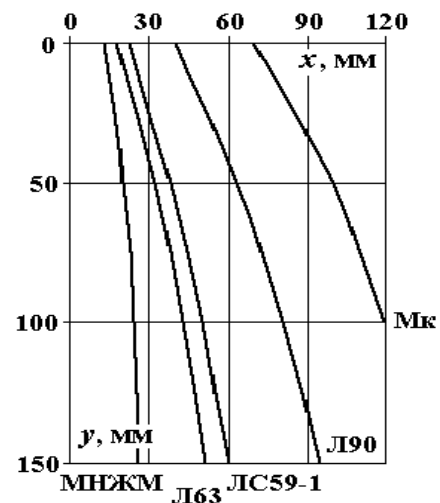
б

Рис. 16. Стенд для испытаний сепаратора с возбуждением от постоянных магнитов (а) и ротор сепаратора (б)

Основными задачами экспериментальных исследований являлись: проверка достоверности расчетов магнитных полей, электромагнитных усилий, других характеристик процессов электродинамической сепарации, а также опытное подтверждение выдвигаемых теоретических положений. В ряде случаев измерение усилий извлечения в ходе экспериментов оказывалось затруднительным, например, в случае извлечения проводящих частиц малых размеров, либо металлических тел с низкой электропроводностью (некоторые сплавы, алюминиевые шлаки). При этом эффективность сепарации оценивалась по косвенным показателям, таким как: траектория и дальность полета, процент извлечения проводящих частиц и т.п. В таких экспериментах для повышения достоверности результатов использовались многократное повторение опытов и статистическая обработка полученных данных. Пример полученных таким образом результатов для случая сортировки образцов медных сплавов на установке с наклонной плоскостью показан на рис. 17.



а



б

Рис. 17. Траектории движения образцов медных сплавов на выходе из активной зоны сепаратора при наклонах плоскости 30° (а) и 45° (б)

Важной задачей экспериментальных работ являлось опробование процессов электродинамической сепарации при решении реальных технологических задач по техническим заданиям предприятий – заказчиков. Созданные в лаборатории установки электродинамической сепарации разных типов позволяют проводить полномасштабные эксперименты в указанном направлении. В частности, исследованы такие технологии, как:

- сортировка лома и отходов цветных металлов при подготовке их к металлургическому переделу (по заказу НПФ «Металл-Комплект», г. Каменск-Уральский);
- извлечение цветных металлов из различных сыпучих смесей, прежде всего, металлосодержащих отходов (по заказу предприятия «Полимер-Про» г. Москва и ряда других);
- обогащение алюминиевых шлаков (по заказу предприятия «Уралпрогресс» г. Асбест).

В ходе испытаний получены рекомендации по использованию той или иной конструкции установки, определены параметры бегущих магнитных полей, при которых решается поставленная технологическая задача.

Созданные опытные сепараторы могут рассматриваться как прототипы реальных промышленных установок, служат базой для отработки новых технологий электродинамической сепарации. На лабораторных установках выполняются научно-исследовательские работы студентов, а также экспериментальные исследования в рамках их дипломных работ.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен патентно-библиографический обзор и показана актуальность разработки устройств электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле, применяемых на различных стадиях заготовки и производства вторичных цветных металлов. Обоснована необходимость совершенствования сепараторов с целью повышения их эффективности, в первую очередь, сепараторов, предназначенных для обработки мелких фракций лома цветных металлов (с размерами менее 40 мм) и для обработки материалов с низкой электропроводностью.

2. Проанализированы особенности электромагнитных процессов в электродинамических сепараторах с вращающимися цилиндрическими индукторами и дополнительными элементами магнитной системы (обратный магнитопровод и (или) магнитные шунты) и обоснован выбор их расчетной модели. Разработана методика электромагнитного расчета таких сепараторов, сочетающая численные методы расчета магнитных полей сложной конфигурации (пакет Elcut) и расчет электромагнитных усилий по аналитическим выражениям, полученным при решении более простой задачи в двумерной постановке. При этом исходной величиной для расчета электромагнитного усилия является амплитуда индукции магнитного поля в месте расположения проводящей пластины, определяемая при расчете поля.

3. Выполнена проверка достоверности рассчитываемых характеристик сепаратора на основании сравнения с экспериментальными данными ряда лабора-

торных установок, показавшая, что в широком диапазоне изменения параметров погрешности расчетов электромагнитных усилий не превышают 15-20%.

4. Показаны возможности усиления магнитного поля в активной зоне сепараторов за счет установки дополнительных элементов магнитной цепи (обратного магнитопровода и (или) магнитных шунтов), приводящего к увеличению электромагнитного усилия извлечения в несколько раз. Проанализированы искажения магнитного поля при наличии дополнительных элементов магнитной цепи, показано, что для исследованных сепараторов при расстояниях от поверхности индуктора более 5 мм, характерном для работы реальных устройств, возмущение усилия от действия высших гармоник не превышает 5-7%. Дана оценка влияния размеров дополнительного магнитопровода и магнитных шунтов на характеристики сепараторов.

5. Показано, что применение дополнительных элементов магнитопровода позволяет использовать при сепарации меньшие рабочие частоты магнитного поля. Отмечено, что при малых размерах проводящих тел ($b < 40$ мм) и низкой электропроводности экстремумы зависимостей $F_m(f)$ достигаются при частотах выше 400 Гц.

6. Обоснована необходимость системного подхода к расчету электродинамических сепараторов как сложного электромеханического устройства с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил. Показано изменение характера механических сил сопротивления при изменении способов подачи и отвода сепарируемых материалов. Предлагается проектирование сепараторов выполнять на основе взаимосвязанных электромагнитного расчета и расчета процессов массопереноса, в простых случаях сводимого к решению уравнений движения извлекаемых проводящих тел.

7. На основе решения уравнений движения и уравнений энергетического баланса для извлекаемых проводящих тел разработаны методики расчета сепараторов с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил для различных типов индукторов и способов подачи сепарируемого материала. Выявлены закономерности изменения требуемого удельного электромагнитного усилия при изменении параметров механической части сепаратора. Показаны пути снижения удельных электромагнитных усилий для сепараторов, предназначенных для обработки мелких фракций и материалов с низкой электропроводностью.

8. При непосредственном участии автора созданы опытные образцы электродинамических сепараторов с различными типами индукторов, на которых выполнен большой объем экспериментальных исследований и проведена апробация ряда технологий, в том числе по заданию предприятий – заказчиков.

Основная часть исследований выполнялась в интересах заинтересованных предприятий для оценки возможностей реализации ряда технологических операций (сортировка медьсодержащих сплавов, извлечение металла из отходов, обогащение алюминиевых шлаков). Результаты исследований и предложения по созданию промышленных образцов сепараторов переданы на предприятия: НПФ «Металл-комплект», г. Каменск-Уральский; НПФ «Полимер-Про», г. Москва; ОАО «Уралпрогресс», г. Асбест.

Кроме того, созданные установки и методики расчета используются в учебном процессе кафедр «Электрические машины» и «Электротехника и электротехнологические системы» УГТУ-УПИ, прежде всего при выполнении УИРС и НИРС, в курсовом и дипломном проектировании.

Основные результаты диссертации опубликованы в 24 работах (выделены публикации в журналах, рекомендованных ВАК):

1. Повышение энергетической эффективности установок электродинамической сепарации / Р.О. Казанцев, Н.Е. Маркин, А.Ю. Коняев и др. // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Труды 3-й научно-практической конференции. - Екатеринбург, 2003, с. 119-121.

2. Создание опытных установок электродинамической сепарации для обработки твердых металлосодержащих отходов / А.Ю. Коняев, Н.Е. Маркин, К.В. Кузнецов и др. // Экологические проблемы промышленных регионов: Сборник материалов Всероссийской НПК. – Екатеринбург: УРО РАН, 2004, с. 319-320.

3. Коняев А.Ю., Кузнецов К.В., Маркин Н.Е. Оценка целесообразности и эффективности электродинамической сепарации твердых бытовых отходов / Энергосберегающие техника и технологии: Сборник докладов 7-й научно-технической конференции. - Екатеринбург, 2004, с. 44-47.

4. Моделирование индуктора электродинамического сепаратора методом конечных элементов с целью оптимизации магнитной системы / К.В. Кузнецов, А.Ю. Коняев, Н.М. Маркин и др. // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Сборник докладов 4-й научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2004, с. 75-78.

5. О расчете электродинамических сепараторов с вращающимся магнитным полем / И.А. Коняев, К.В. Кузнецов, Н.Е. Маркин, А.Ю. Коняев // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. – Уфа: УГАТУ, 2005, с. 82-87.

6. Схемы сепарации твердых отходов с универсальными сепараторами металлов / И.А. Коняев, И.В. Кистанов, Н.Е. Маркин, А.Ю. Коняев // Экологические проблемы промышленных регионов: Труды Всероссийской НПК. Екатеринбург, 2006, с. 91-92.

7. Совмещение функций – путь повышения энергоэффективности электродинамической сепарации / А.Ю. Коняев, Н.Е. Маркин, С.В. Соболев и др. // Энергетика региона, 2006, № 9, с. 27-29.

8. Сепарация металлов из твердых отходов / И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, В.Н. Удинцев, А.Ю. Коняев / Экология и промышленность России, 2006, № 12, с. 8-11.

9. Оценка характеристик электромагнитного сепаратора для сортировки стружки / И.В. Горев, С.В. Копцев, Н.Е. Маркин и др. // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Труды Третьей Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2007, с. 231-234.

10. Оценка нормальных электромагнитных сил в устройствах электродинамической сепарации / Р.О. Казанцев, А.Ю. Коняев, Н.Е. Маркин, В.Н.

Удинцев // Труды 7-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки-2000», 2007, с. 90-93.

11. **Особенности расчета электродинамических сепараторов с вращающимся магнитным полем / И.А.Коняев, Н.Е.Маркин, С.Л.Назаров, А.Ю.Коняев // Электричество, 2007, № 10, с. 68-72.**

12. Коняев А.Ю., Маркин Н.Е. Особенности процессов разделения металлосодержащих отходов при использовании универсальных сепараторов металлов / Экологические проблемы промышленных регионов: Материалы VIII МНТК. – Екатеринбург, 2008, с. 133.

13. Индукционные электрические машины для электродинамической сепарации / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, В.Н. Удинцев // Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». – Украина, Алушта, 2008, с. 108-109.

14. **Оценка эффективности и областей применения электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин и др. // Промышленная энергетика, 2009, № 6, с. 16 – 20.**

15. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Маркин Н.Е. Электродинамическая сепарация в технологиях подготовки лома и отходов цветных металлов // Труды Международной НТК «Успехи современной электротехнологии». – Саратов, 2009, с. 106-109.

16. **Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // Электричество, 2010, № 4, с. 32-36.**

17. **Разработка электродинамических сепараторов на базе роторов серийных электрических машин / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика, 2010, № 5, с. 47-51.**

18. Характеристики электродинамических сепараторов на базе линейных асинхронных двигателей / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, А.Б. Исангулова, Н.Е. Маркин // Автоматизированные информационные и электроэнергетические системы: материалы 1 Межвузовской научно-практической конференции. – Краснодар, КубГТУ, 2010, с. 29-32.

19. Коняев А.Ю., Маркин Н.Е., Назаров С.Л. Электродинамические сепараторы в технологиях переработки лома и отходов цветной металлургии / Инновационная энергетика 2010: материалы второй научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010, с. 239-242.

20. Исангулова А.Б., Маркин Н.Е., Коняев А.Ю. К расчету электродинамических сепараторов на основе линейных асинхронных двигателей / Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2010, с. 85-87.

21. Электромеханические устройства в технологиях переработки лома и отходов цветной металлургии / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин. //

Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: материалы Международной научно-технической конференции. - Севастополь: СГТУ, 2010, с. 66-67

22. Совершенствование магнитной системы электродинамических сепараторов с вращающимся индуктором / И.А.Коняев, Н.Е.Маркин, А.Ю. Коняев // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сб. трудов IV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2011, с. 353-357.

23. Багин Д.Н., Коняев А.Ю., Маркин Н.Е. О эффективности электродинамической сепарации в технологиях вторичной цветной металлургии // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: сб. научн. трудов. - Екатеринбург: УрФУ, 2011, с. 193-196.

24. Коняев А.Ю., Маркин Н.Е. Расчет электродинамических сепараторов шкивного типа с учетом совместного действия электромагнитных и конкурирующих механических сил // Там же, с. 197-202.

Подписано в печать ____ .05.2011

Формат 60×84 1/16

Тираж 100

Заказ № _____

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, Мира, 19